Оценка содержания загрязняющих веществ над районами Байкальской природной территории по спутниковым данным, данным реанализа и антропогенных выбросов по данным кадастра за 2000-2025 гг.

Родионова Н.В.

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, МО*

rnv1948123@yandex.ru

24-я Международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", ИКИ РАН.

9-13 ноября 2026 г. Москва

ВВЕДЕНИЕ

Для отдельных районов Байкальской природной территории (БПТ), входящих в три экологические зоны Байкала, включая его акваторию, определены по спутниковым данным сезонные и межгодовые вариации аэрозольной оптической толщи (AOT) (MODIS/Terra), содержание в атмосфере диоксида серы (SO_2) (OMI/Aura), угарного газа (CO) (MOPITT/Terra), содержание черного углерода (BC) по данным реанализа MERRA-2, а также определены антропогенные выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) по данным кадастра CAMS- GLOB-ANT онлайн-сервиса ECCAD за период 2000-2025 гг.

Байкальская природная территория включает три экологические зоны, находящиеся в Иркутской области и республике Бурятия- это центральная экологическая зона (ЦЭЗ), экологическая зона атмосферного влияния (ЭЗАВ) и буферная экологическая зона (БЭЗ) (рис. 1) (http://geol.irk.ru/baikal/baikal/baikalandbpt/bptecologyzones/bptecologyzonesmap.png). Стрелки на карте (рис.1) указывают на районы исследования: 1- Иркутск, 2- южная часть акватории Байкала (ЮЧАБ), 3- Селенгинск, 4- Улан-Уде, 5- акватория в районе Ушканьих островов, 6- Северобайкальск.

Введение

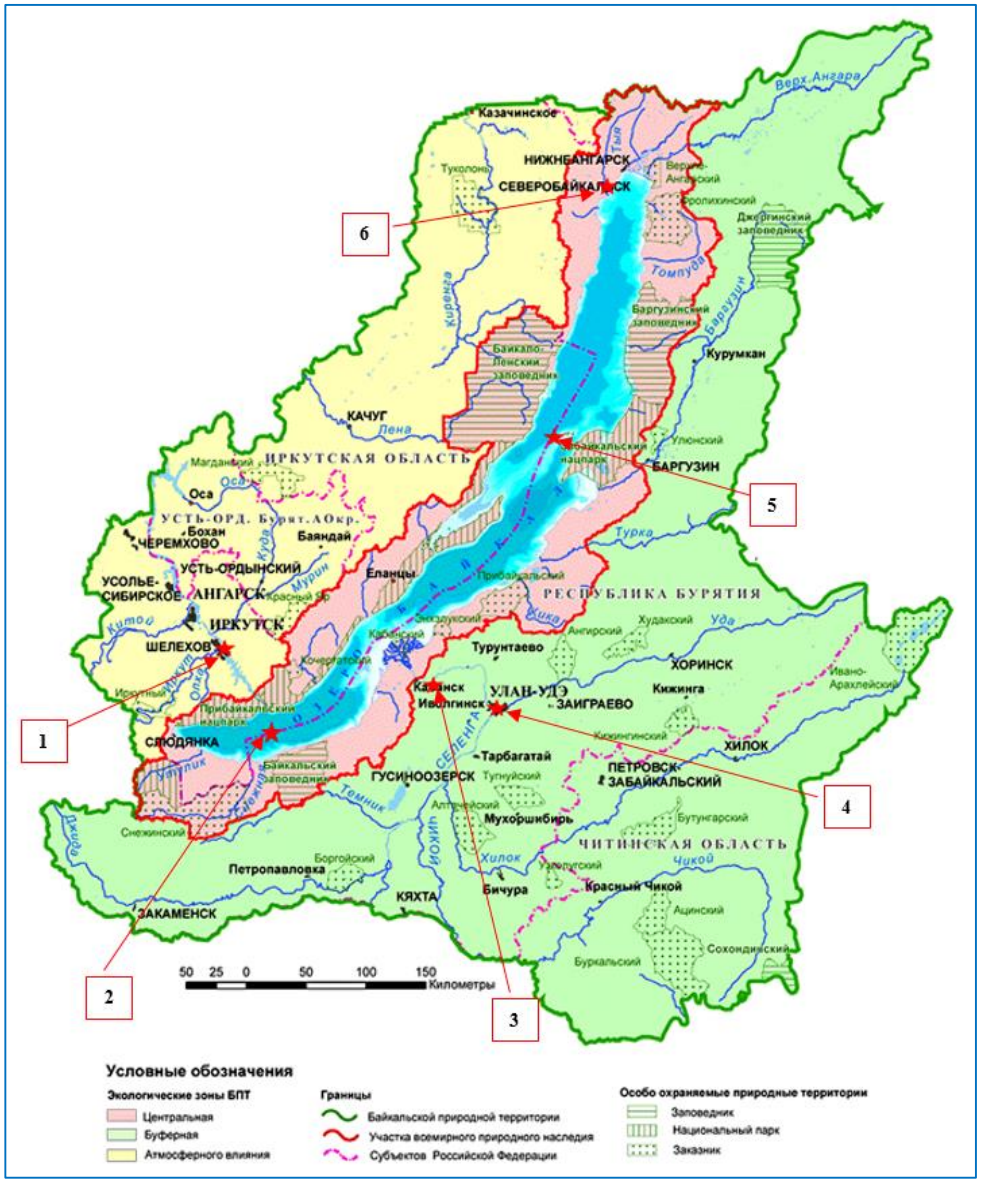


Рис. 1. Карта экологических зон Байкала с отмеченными районами исследования

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ CO, SO_2 и BC НА ИССЛЕДУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ЗА 2000-2024 гг

В данной работе рассмотрены антропогенные выбросы угарного газа CO, диоксида серы SO_2 и черного углерода BC. Угарный газ поступает в атмосферу в результате неполного сгорания топлива. Главным источником оксида углерода является транспорт. CO содержится также в выбросах предприятий металлургии и нефтехимии. Время жизни CO в атмосфере около месяца. Вдыхаемый в больших количествах оксид углерода поступает в кровь, уменьшает приток кислорода к тканям, повышает количество сахара в крови, ослабляет подачу кислорода к сердцу [1].

Диоксид серы SO_2 поступает в атмосферу при сгорании топлива, содержащего серу. Главным источником диоксида серы в воздухе городов являются электростанции, котельные и предприятия металлургии. Воздействие диоксида серы в концентрациях выше предельно допустимых может приводить к существенному увеличению различных болезней дыхательных путей. Срок жизни диоксида серы в атмосфере составляет менее недели.

Черный углерод BC состоит из чистого углерода в нескольких связанных формах. Он образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива, биотоплива и биомассы и является одним из основных типов частиц в саже. Являясь компонентом взвешенных частиц PM2.5, BC загрязняет атмосферу и, попадая в организм человека, приводит к заболеваниям, связанным с нарушением кровообращения сердца и мозга из-за кислородного голодания. Время жизни BC в атмосфере – от нескольких дней до недели

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ

Кадастр CAMS-GLOB-ANT (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) с пространственным разрешением (ПР) 0.1ºx0.1º для периода 2000-2025 гг. онлайн-сервис ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds &Compilation of Ancillary Data) (http://eccad.aeris-data.fr) [2].

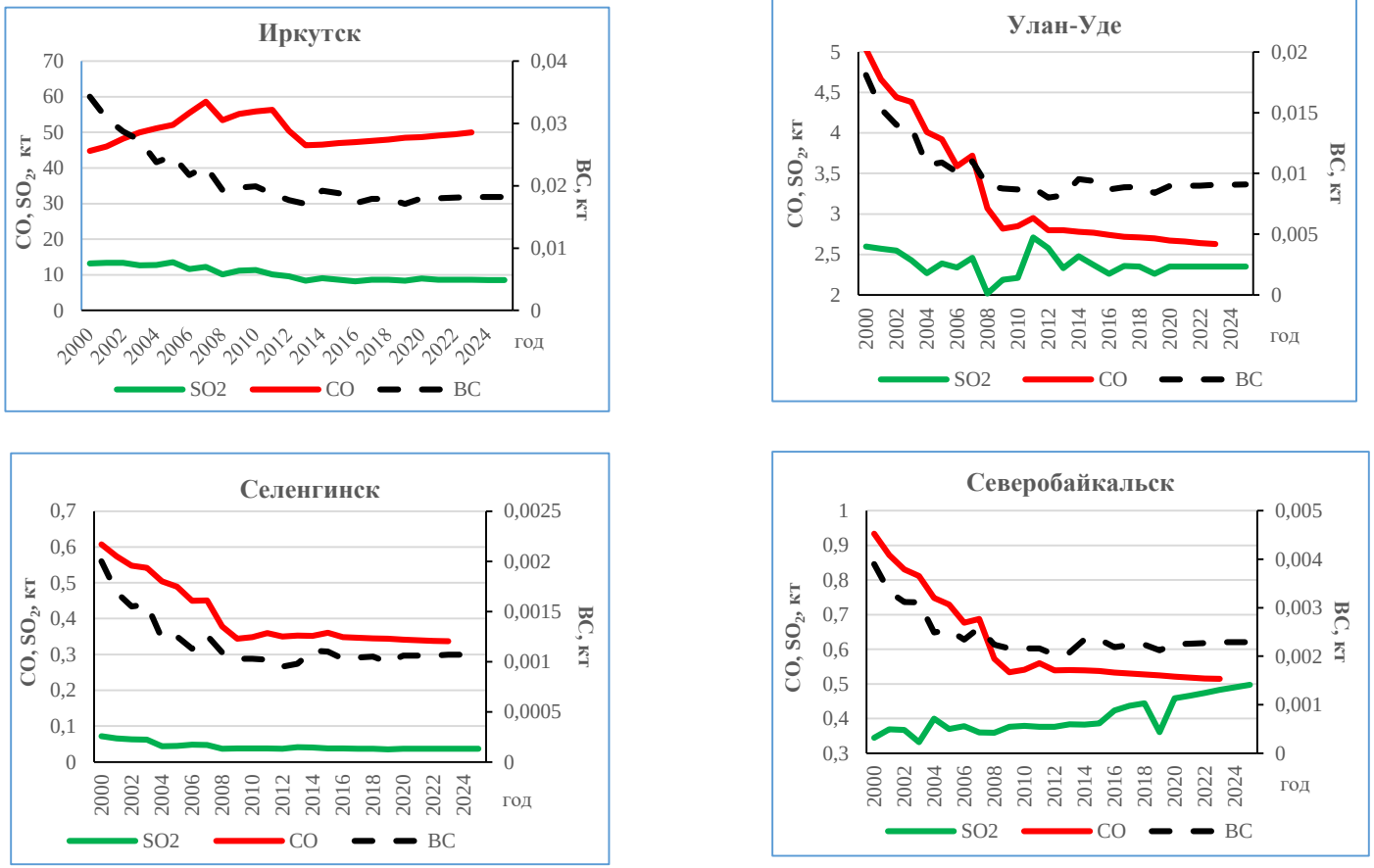
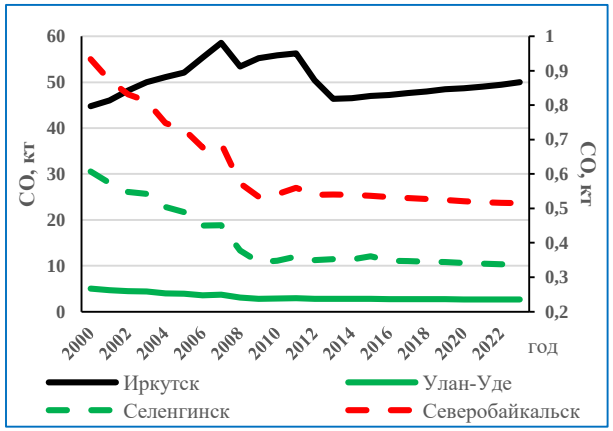
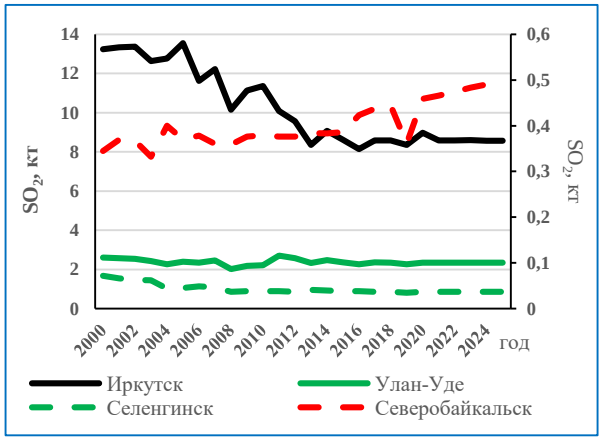


Рис. 2. Годовые антропогенные выбросы CO, SO_2 и BC по сумме секторов в атмосферу исследуемых территорий

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ





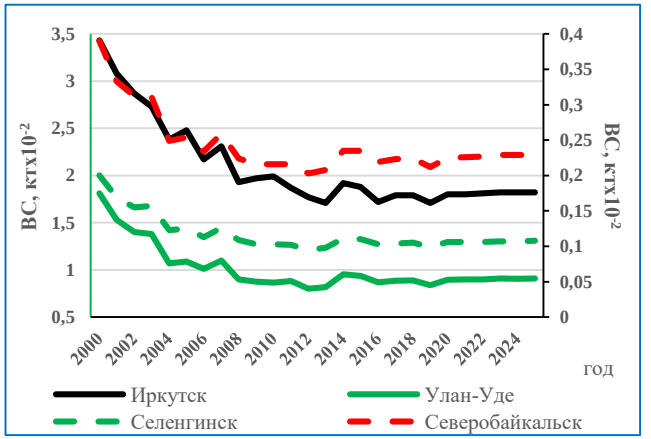


Рис. 3. Сравнение годовых антропогенных выбросов CO, SO_2 и BC в атмосферу по сумме секторов (в пределах ячейка сетки 0.1°x0.1°)

Основные выводы по антропогенным выбросам ЗВ для исследуемых территорий на основе кадастра CAMS-GLOB-ANT (по сумме секторов в пределах ячейки сетки 0.1°x0.1°):

- выбросы CO в 2÷10 раз превышают выбросы SO_2 и в сотни раз выбросы BC с отрицательным трендом для всех рассмотренных территорий, кроме Иркутска, где есть положительный тренд после 2013 года;

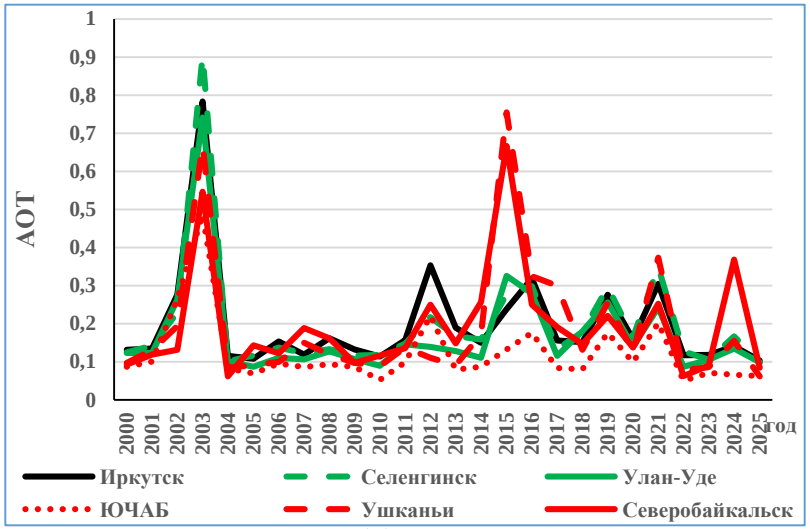
- вторым по объемам антропогенных выбросов среди рассмотренных ЗВ является SO_2, с положительным трендом для Северобайкальска;

- превышение антропогенных выбросов CO (в пределах ячейки сетки 0.1°x0.1° по сумме секторов) для Иркутска относительно Улан-Уде составляет 9÷19 раз, Северобайкальска - 50÷100 раз и Селенгинска - 70÷150 раз. Превышение выбросов SO_2, соответственно, 3÷5 раз, 17÷38 раз, 180÷300 раз. И соответствующие значения для BC – 2 раза, 8÷9 раз, 17÷19 раз.

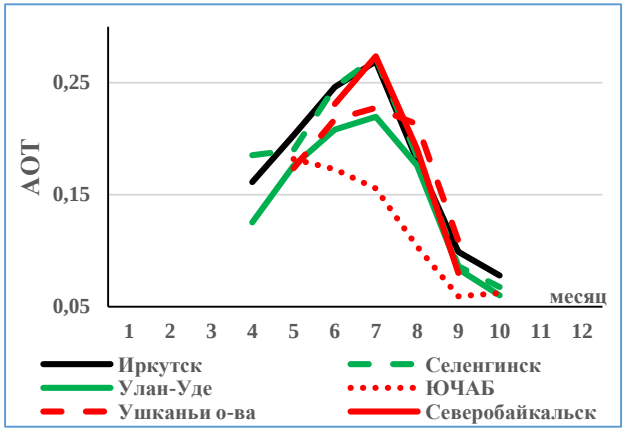
Спутниковая оценка и оценка по данным реанализа состояния атмосферы отдельных районов БПТ за 2000-2025 гг.

•*Спутниковая оценка значений АОТ*

•(прибор MODIS спутника Terra, продукт MOD08_M3 v6.1, ПР 1°x1°, длина волны 550 нм)

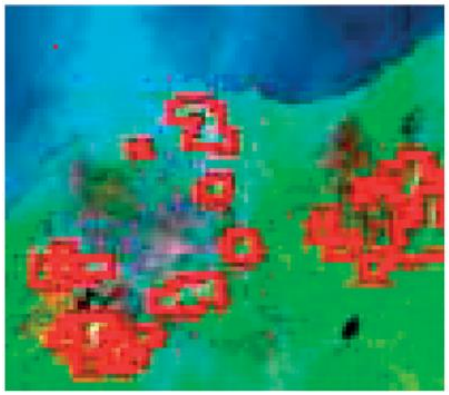


(а)

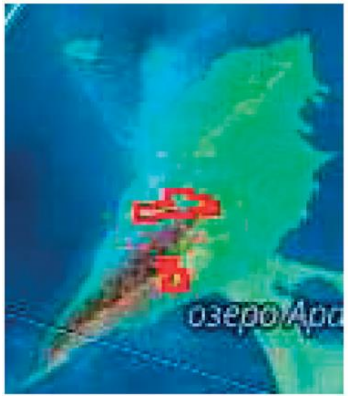


(б)

Рис. 4. Межгодовые (июнь-сентябрь) (а) и сезонные вариации АОТ (а) и ско АОТ (б) для исследуемых территорий



(а)

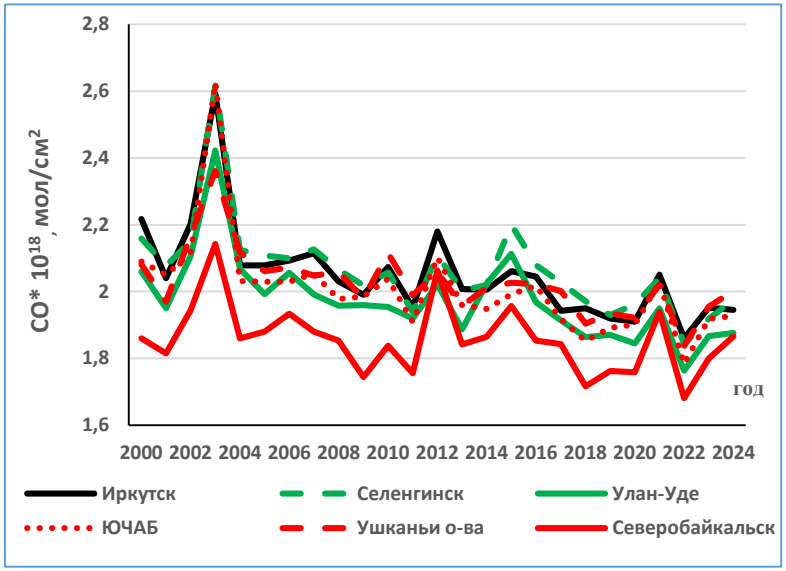


(б)

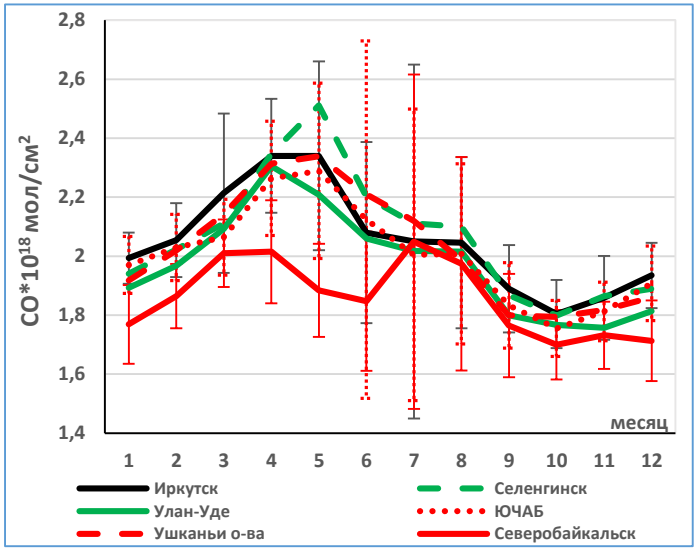
Рис. 5. Карта пожаров за 21 августа 2015 г. для территории Тонкого мыса (а) и п-ва Святой нос (б) по космоснимкам системы оперативного мониторинга СКАНЭКС, Landsat

Спутниковая оценка содержания угарного газа CO в атмосфере за 2000-2024 гг.

(Прибор MOPITT/Terra (Measurements of Pollution in the Troposphere) осуществляет надирные измерения в ИК диапазоне 4.7 мкм и 2.2-2.4 мкм с ПР в горизонтальной плоскости 22 км)



(а)



(б)

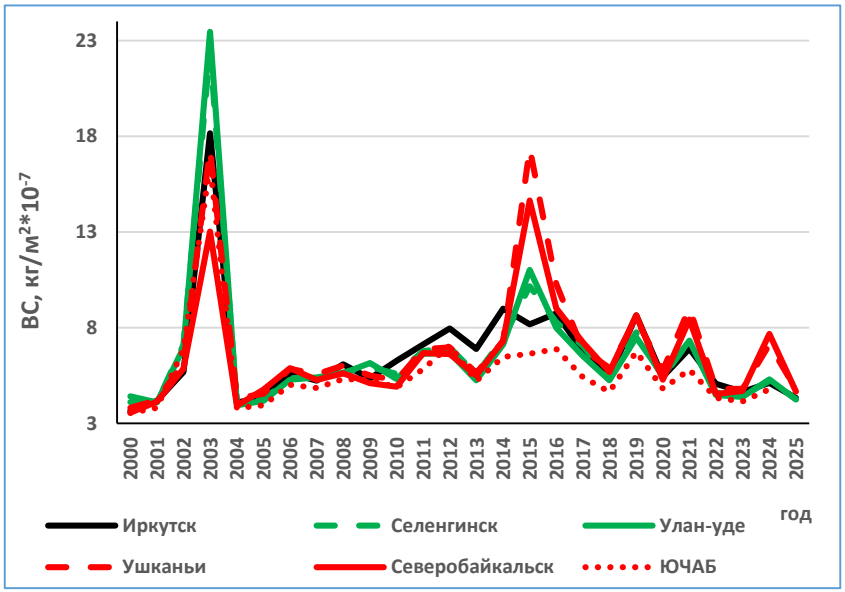
Рис. 6. Межгодовые (а) и сезонные (б) вариации CO для исследуемых территорий

Таблица 1. Корреляция CO-ECCAD (ss) с CO-MOPITT

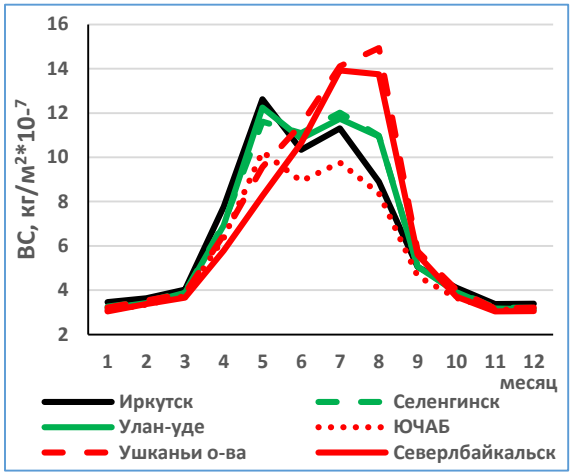
CO ECCAD/MOPITT	Иркутск	Селенгинск	Улан-Уде	Северобайкальск
ρ_s	0.14	0.79	0.67	0.45
p	0.26	10^{-6}	$2*10^{-4}$	0.01
N	24	24	24	24

Оценка содержания черного углерода (BC) в атмосфере по данным реанализа MERRA-2

Для оценки содержания BC в столбе атмосферы (Black carbon column mass density, кг/м^2) использованы среднемесячные данные реанализа MERRA-2 (http://giovanni.gsfc.nasa.gov) за 2000-2025 годы, продукт MERRA-2 Reanalysis M2TMNXAER v5.12.4, Monthly, 0.5°x0.625° (широта x долгота). Реанализ -научный метод восстановления и описания погоды и климата в прошлом, объединив реальные наблюдения и компьютерные модели.



(а)



(б)

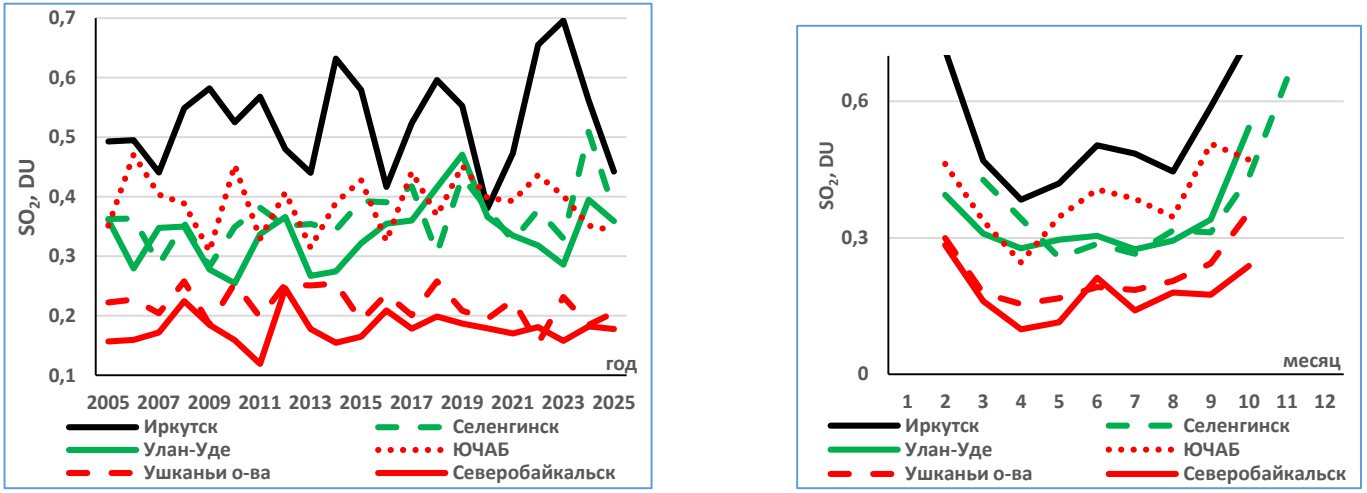
Рис. 7. Межгодовые (а) и сезонные (б) вариации BC для исследуемых территорий

Таблица 2. Корреляция межгодовых значений AOT и BC за период 2000-2025 гг.

BC/AOT	Иркутск, 4-10 месяцы	Селенгинск, 4-10 месяцы	Улан-Уде, 4-10 месяцы	ЮЧАБ, 5-10 месяцы	Ушканьи-о-ва, 5-9 месяцы	Северобайкальск, 6-9 месяцы
ρ_s	0.68	0.68	0.82	0.6	0.71	0.88
p	10^{-5}	$5x10^{-5}$	0	$7x10^{-4}$	$2x10^{-5}$	0
N	26	26	26	26	26	26

Спутниковая оценка содержания диоксида серы (SO_2) в атмосфере

Содержание диоксида серы в столбе атмосферы по измерениям прибора OMI спутника Aura [3] Column Amount Daily (ежесуточное суммарное содержание в атмосферном столбе) с ПР=0.25°x0.25° для периода 2005-2025 гг. на базе использования системы Giovanni (giovannt.gsfc.nasa.gov). Спектрометр OMI работает в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах 264-504 нм. Данные OMI SO_2 представлены в единицах Добсона DU (1 DU=2,69 x 10^{16} молекул/см^2).



(а) (б)

Рис. 6. Межгодовые (а) и сезонные (б) вариации SO_2 для исследуемых территорий

Вклад природных источников в общую концентрацию SO_2 в атмосфере слабее, чем антропогенных. Корреляция между антропогенными выбросами SO_2 по данным кадастра CAMS-GLOB-ANT и межгодовым содержанием SO_2 в столбе атмосферы по измерениям OMI/Aura отсутствует, как и отсутствует корреляция между SO_2 и AOT для всех территорий.

Тренды содержания диоксида серы в столбе атмосферы для исследуемых территорий за период 2005-2025 гг. положительные

ВЫВОДЫ

На чистоту воздуха над территориями БПТ, входящих в три экологические зоны Байкала ЭЗАВ, ЦЭЗ и БЭЗ, оказывают влияние как антропогенные, так и природные факторы.

Для всех городов (Иркутск, Улан-Уде, Селенгинск, Северобайкальск) по объемам антропогенных выбросов (кадастра) лидирует угарный газ CO, В Иркутске (в пределах ячейки сетки 0.1ºx0.1º) превышение выбросов CO над остальными городами составляет десятки раз. Есть положительная связь вплоть до тесной между антропогенными выбросами CO в Улан-Уде, Селенгинске и Северобайкальске и спутниковыми измерениями CO в столбе атмосферы (MOPITT/Terra). Тренды содержания CO в столбе атмосферы за период 2000-2025 гг. отрицательные для всех исследуемых территорий БПТ, включая акваторию Байкала.

Вторым по объемам антропогенных выбросов является диоксид серы SO_2. Лидирует Иркутск, превышение выбросов SO_2 в котором (в пределах ячейки сетки 0.1ºx0.1º) составляет от нескольких до сотен раз над остальными территориями. По спутниковым данным (OMI/Aura) содержание SO_2 в столбе атмосферы на два порядка меньше, чем CO. Тренды содержания SO_2 в столбе атмосферы за период 2005-2025 гг. положительные, кроме акватории Байкала.

Содержание аэрозолей в атмосфере над БПТ прежде всего зависит от природных факторов, главными из которых являются лесные пожары. Так аномальные по мощности лесные пожары в Иркутской области в 2003 году привели к пику значений AOT (MODIS/Terra) в экологических зонах БЭЗ (Селенгинск, Улан-Уде) и ЭЗАВ (Иркутск). Аномальные пожары в Бурятии в 2015 году привели к пику значений AOT в ЦЭЗ, включая акваторию. Есть тесная связь между содержанием BC в столбе атмосферы (MERRA-2) и значениями AOT, обусловленная тем, что концентрация аэрозолей в воздухе в большей степени связана с выбросом сажи при горении леса.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.


СПАСИБО!

ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2020 год. Ежегодник. СПб. 2021. ФГБУ, “ГГО” Росгидромета. 2021 http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2021/ejegodnik_zagr_atm_2020.pdf.
2. Peuch V.-H., et al. Final Report MACC-II Monitoring Atmospheric Composition and Climate - Interim Implementation, MACC-II Final Report – October 2014.
3. Levelt P., Oord G.H.J., Dobber M., Malkki A., Visser H., Vries J., Stammes P., Lundell J.O.V., Saari H. The ozone monitoring instrument// IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 2006. 44. P. 1093-1101. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872333.